

Mogućnosti proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj iz srednjetemperaturnih geotermalnih izvora

Zvonimir Guzović
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Zavod za energetiku, energetska postrojenja i ekologiju
Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb
Hrvatska
e-mail: zvonimir.guzovic@fsb.hr

Boris Majcen
Elektroprojekt d.o.o.
Alexandera von Humboldta 4, 10000 Zagreb
Hrvatska
e-mail: boris.majcen@elektroprojekt.hr

Sažetak

1998. godine Energetski institut "Hrvoje Požar" je pripremio program korištenja geotermalne energije u Republici Hrvatskoj, koji pokazuje da Hrvatska ima nekoliko srednjetemperaturnih geotermalnih izvora s relativno niskim temperaturama geotermalne vode u području od 100 do 140°C, pomoću kojih je moguća proizvodnja električne energije, npr. Lunjkovec-Kutnjak (140°C), Ferdinandovac (125°C), Babina Greda (125°C) i Rečica (120°C). No, konkretne inicijative za gradnju geotermalnih elektrana pokrenute su tek posljednjih godina. Za proizvodnju električne energije iz srednjetemperaturnih geotermalnih izvora dolaze u obzir elektrane s binarnim ciklusom, bilo s organskim Rankineovim ciklusom (ORC) ili Kalina ciklusom. U literaturi se Kalina ciklus navodi kao termodinamički povoljniji ciklus od ORC, tj. koji postiže veću termodinamičku iskoristivost i daje više snage. S druge strane, spoznaje autora objavljene u prethodnim radovima, a predstavljene i na 3. međunarodnom forumu o obnovljivim izvorima energije ovdje u Dubrovniku, dobivene na temelju proračuna za srednjetemperaturni geotermalni izvor u Hrvatskoj (Velika Ciglena) s relativno visokom temperaturom geotermalne vode (175°C) pokazuju suprotno. ORC je termodinamički bolji od Kalina ciklusa. To se objašnjava relativno visokom temperaturom geotermalne vode kao i relativno visokom prosječnom godišnjom temperaturom zraka za hlađenje u kondenzator (15°C), koji ima nepovoljniji utjecaj na Kalina ciklusa nego na ORC. U ovom radu usporedba ORC i Kalina ciklusa će se provesti za srednjetemperaturno geotermalno polje s relativno niskom temperaturom geotermalne vode (140°C) i ponovo uz relativno visoku prosječnu godišnju temperaturu zraka za hlađenje u kondenzatoru (15°C): konkretno za geotermalno polje Lunjkovec-Kutnjak. Usporedba ORC i Kalina ciklusa će se provesti na temelju rezultata energetske analize. Konačni cilj usporedbe je predložiti najpovoljnije binarno postrojenje, bilo s ORC ili Kalina ciklusom, za srednjetemperaturne geotermalne izvore u Republici Hrvatska s relativno niskom temperaturom geotermalne vode. Za oba ciklusa izvršena je optimizacija njihovih glavnih parametara: za ORC gornjeg (maksimalnog) tlaka ciklusa a Kalina ciklus koncentracije amonijaka.

Ključne riječi: geotermalna energija, geotermalna elektrana, organski Rankineov ciklus (ORC), Kalina ciklus, Lunjkovec-Kutnjak

1. Uvod

Geotermalna energija je energija sadržana u Zemljinoj unutrašnjosti, te je izvor čiste energije pošto ispunjava u današnje vrijeme dva značajna koncepta pri iskorištavanju energetske izvora: obnovljivost i održivost.

Geotermalna energija uglavnom nastaje polaganim prirodnim raspadanjem radioaktivnih elemenata (u prvom redu urana, torija i kalija) koji se nalaze u Zemljinoj unutrašnjosti, te se često naziva i fosilnom nuklearnom energijom. Osim radioaktivnog raspada, toplina se u Zemljinoj unutrašnjosti stvara i npr. egzotermnim kemijskim reakcijama, kristalizacijom i skrućivanjem rastopljenih materijala, te trenjem pri kretanju tektonskih masa.

Procjenjuje se da je cjelokupna toplinska energija Zemlje oko $12,6 \cdot 10^{24}$ MJ, od čega Zemljina kora sadrži $5,4 \cdot 10^{21}$ MJ. Dakle toplinski kapacitet Zemlje je ogroman, ali se samo vrlo malen dio može ekonomično iskoristiti [1]. Ako se računa i s energijom nagomilanom u vrućim suhim stijena, to se s obzirom na energetske potrebe čovječanstva može smatrati gotovo neiscrpnom.

Temperatura Zemljine unutrašnjosti raste s povećanjem dubine. Porast temperature po jedinici dubine naziva se geotermalni (temperaturni) gradijent, te je bitan za mogućnost iskorištavanja geotermalne energije. Prosječna vrijednost geotermalnog gradijenta za Europu iznosi $0,03^\circ\text{C}/\text{m}$ [1].

Kad se govori o iskorištavanju geotermalne energije ne misli se na energiju koja na površinu dopire provođenjem, nego na energiju koja je nagomilana u unutrašnjosti Zemljine kore bilo u obliku vruće vode ili pare, te u suhim stijena. U tu svrhu potrebno je iskoristiti prirodno kruženje vode ili stvoriti uvjete za takvo kruženje. Osnovni je princip u tome da se voda s površine dovodi u dublje slojeve, u njima se ugrije i tako ugrijana se pojavljuje na površini.

Tako se na određenim dubinama Zemljine kore stvaraju ležišta geotermalnog fluida čija se energija može iskorištavati na posredan ili neposredan način zavisno o temperaturi i sastavu.

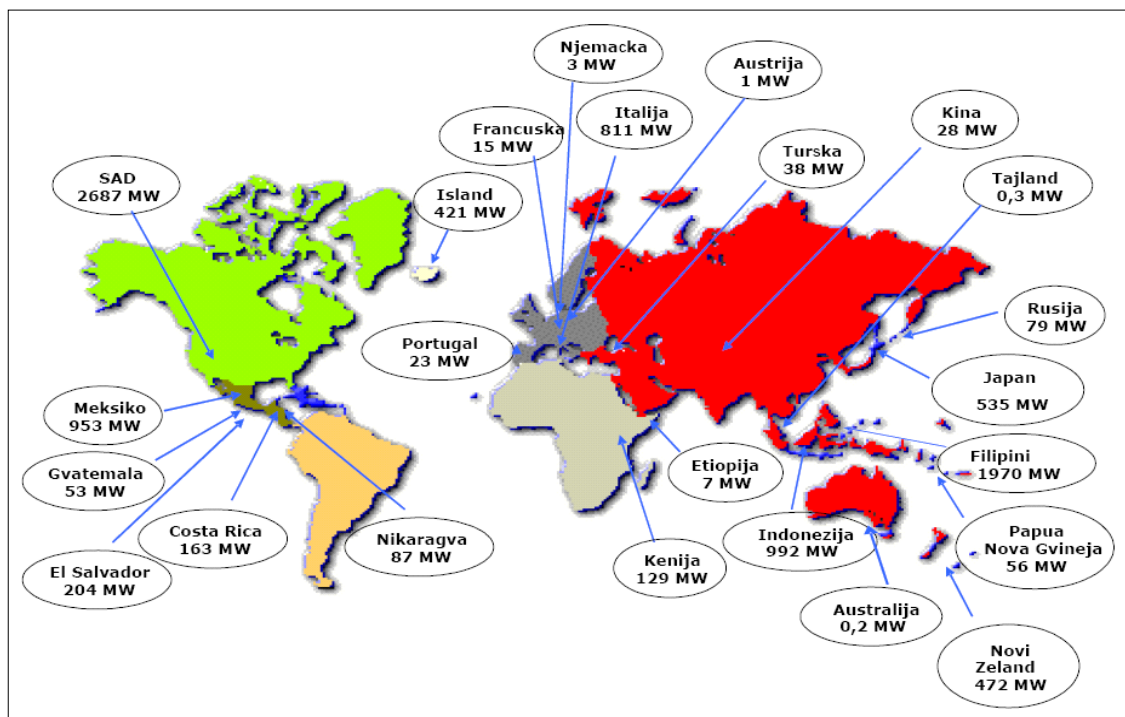
Najčešće korištena klasifikacija geotermalnih resursa je temeljena na temperaturi geotermalne vode. Geotermalni resursi su podijeljeni na niske ($<100^\circ\text{C}$), srednje ($100 - 200^\circ\text{C}$) i visokotemperaturne fluide ($>200^\circ\text{C}$) [2].

Danas se geotermalna energija koristi za proizvodnju električne energije, za zagrijavanje prostora, staklenika, bazena, u medicinske svrhe (balneologija), u ribnjicarstvu i u različitim industrijskim procesima. Geotermalna energija se također može, ukoliko to ekonomski uvjeti dopuštaju, koristiti za prethodno dogrijavanje fluida u različitim industrijskim i toplinskim sustavima, čime bi se ostvarila ušteda klasičnih izvora energije.

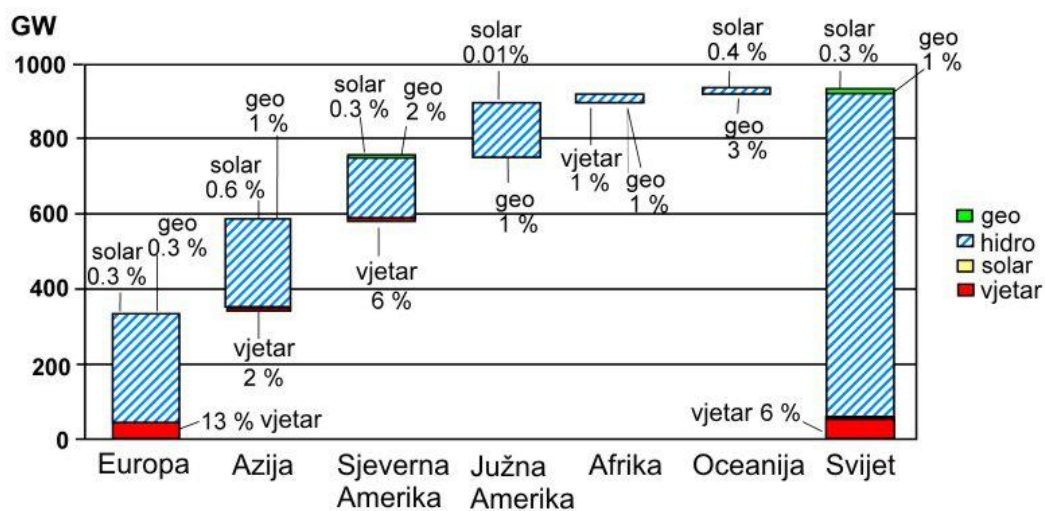
Najvažniji način iskorištavanja visokotemperaturnih geotermalnih izvora ($>200^\circ\text{C}$) je proizvodnja električne energije. Najekonomičniji i najjednostavniji način proizvodnje električne energije je iz ležišta suhe vodene pare u geotermalnim elektranama na suhozasićenu paru [1]. Nešto složenije načini eksploatacije, termoelektrane s isparavanjem i binarne termoelektrane, razvijene za eksploataciju srednetemperaturnih geotermalnih izvora postaju sve više ekonomski konkurentne [1].

Ukupna instalirana snaga geotermalnih elektrana u svijetu 2007. godine je oko 9730 MW, slika 1 [3], a one daju nešto manje od 0,5% proizvedene električne energije, te značajno sudjeluju među obnovljivim izvorima energije, kojima dominira hidroenergija, slika 2 [3]. Porast primjene geotermalne energije osobito je značajan nakon naglog skoka cijene nafte 1973.godine, te zbog sve snažnijih zahtjeva za očuvanje čovjekovog okoliša. Od zemalja u svijetu koje se sve više koriste izvorima geotermalne energije u različite svrhe (zavisno o temperaturi geotermalnog izvora) ističu se SAD, Island (korištenje geotermalne energije je

44% od ukupne energetske potrošnje), Italija, Novi Zeland, Francuska, Njemačka, Mađarska, itd. [3]

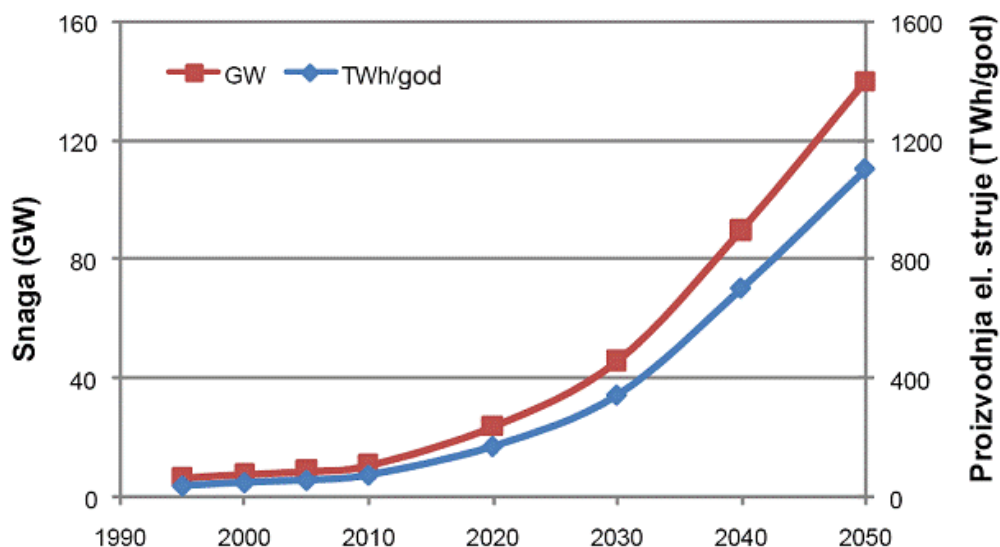


Slika 1. Instalirana snaga geotermalnih elektrana u svijetu 2007. godine [3]



Slika 2. Udio geotermalnih izvora u obnovljivim izvorima energije prema instaliranoj snazi [3]

Daljnja predviđanja porasta instalirane snage geotermalnih elektrana i proizvodnje električne energije iz geotermalne energije vidljiva su iz slike 3 [4].



Slika 3. Instalirana snaga i proizvedena električna energija u geotermalnim elektranama 1995.-2010. i predviđanja za razdoblje 2010.-2050. [4]

U Republici Hrvatskoj postoji višestoljetna tradicija iskorištavanja geotermalne energije iz prirodnih izvora u medicinske svrhe i za kupanje. Razvitkom naftne industrije i usporednim ispitivanjem pojedinih geotermalnih bušotina stvorena je tehnološka osnova za iskorištavanje geotermalne energije za rekreacijsko-medicinske svrhe, grijanje, u proizvodnji voća i povrća u staklenicima te za naknadnu industrijsku toplinsku obradu tako proizvedenih proizvoda (sušenje, pasterizacija), itd., ali i za proizvodnju električne energije. Za sada se geotermalna energija ne koristi za proizvodnju električne energije.

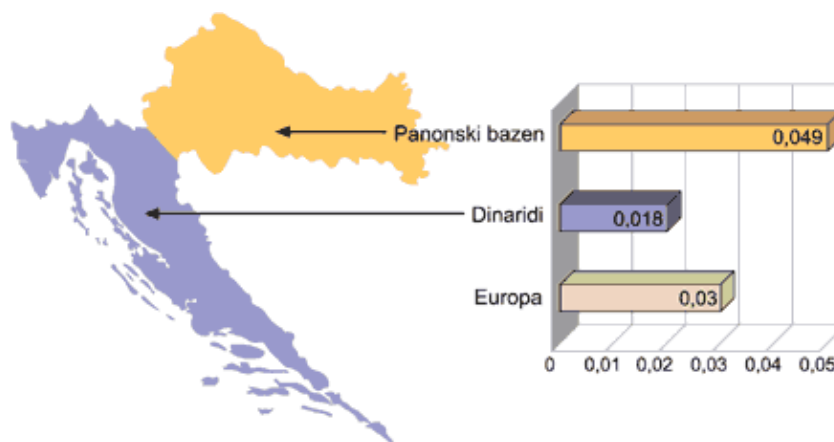
2. Geotermalni potencijal Republike Hrvatske

U Republici Hrvatskoj postoji ukupno 28 geotermalnih polja, od kojih je 18 u uporabi. Za potrebe grijanja prostora instalirano je ukupno 36,7 MW toplinske snage s godišnjom upotrebom energije od 189,6 TJ/god. Za kupanje se koristi 77,3 MW toplinske snage, odn. 492,1 TJ/god [5].

Uz djelatnost istraživanja nafte i plina razvijeni su tehnika i tehnologija za dobivanje geotermalne energije iz dubokih geotermalnih ležišta. Od 1976. godine INA-Naftaplin radi na istraživanju geotermalnih ležišta. Postignuti su jako dobri istraživački rezultati uz mala financijska ulaganja. Temelj tih istraživanja bili su obrađeni podaci dobiveni istražnim bušotinama koje su imale za cilj pronaći rezerve nafte i plina.

Dva sedimentna bazena pokrivaju gotovo cijelo područje Republike Hrvatske: Panonski bazen i Dinaridi, slika 4 [5]. Velike su razlike u geotermalnim potencijalima ta dva bazena koji su dobiveni istražnim radovima u svrhu pronalaska nafte i plina.

U Dinaridima prosječni geotermalni temperaturni gradijent i toplinski tok iznose 0,018 °C/m i 29 mW/m² [5]. Na ovom području nije moguće očekivati otkrića značajnijih geotermalnih ležišta. Za razliku od Dinarida, u Panonskom bazenu prosječni geotermalni gradijent i toplinski tok su mnogo viši: 0,049°C/m i 76 mW/m² [5]. Pošto je geotermalni gradijent u panonskom bazenu znatno veći od europskog prosjeka na ovom području je moguće očekivati, pored već otkrivenih geotermalnih polja, pronalaženje novih geotermalnih polja.



Slika 4. Prosječni geotermalni temperaturni gradijent u Republici Hrvatskoj [5]

Geotermalni potencijali u Republici Hrvatskoj mogu se podijeliti u tri skupine – srednjetemperaturni izvori 100 – 200°C, niskotemperaturni izvori 65 do 100°C i geotermalni izvori s temperaturom vode ispod 65°C.



Slika 5. Geotermalni potencijal Republike Hrvatske [5]

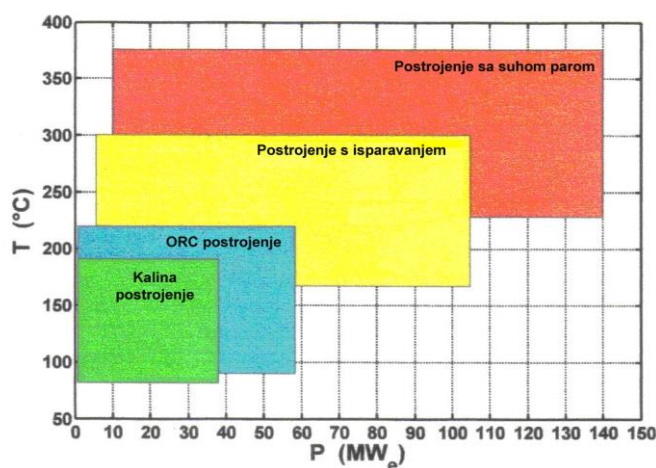
Procjenjuje se da je ukupna toplinska snaga geotermalnih energetskeg potencijala Republike Hrvatske iz već izrađenih bušotina 203,47 MW (do 50°C) odn. 319,21 MW (do 25°C), a u uz potpunu razradu polja 839,14 MW (do 50°C) odn. 1169,97 MW [5].

Također se pretpostavlja da je moguća snaga proizvodnje električne enrgije iz srednjetemperaturnih izvora iz već izrađenih bušotina 10,95 MW, a u uz potpunu razradu ležišta 47,88 MW [5].

3. Tipovi geotermalnih elektrana

Proizvodnja mehaničkog rada pomoću geotermalne energije zahtijeva paru za pogon turbine. Ona može biti dobivena kao vlažna ili suha para iz prirodnih ležišta. Ako ne postoje prirodna ležišta pare, para se može također proizvoditi u vrućim suhim stijenkama ili tzv. naprednim geotermalnim sustavima. Na nižim temperaturnim razinama, para za pogon turbine može se dobiti posredno isparavanjem fluida s nižom točkom ključanja od vode. Ciklus je poznat kao organski Rankineov ciklus (ORC) pošto su na samom početku korištene organske tvari kao toluol (C_7H_8), pentan (C_5H_{12}), propan (C_3H_8), te ostali ugljikovodici [6]. Od nedavno je u probnoj upotrebi i tzv. Kalina ciklus koji koristi mješavinu vode i amonijaka (NH_3) kao radni fluid [7].

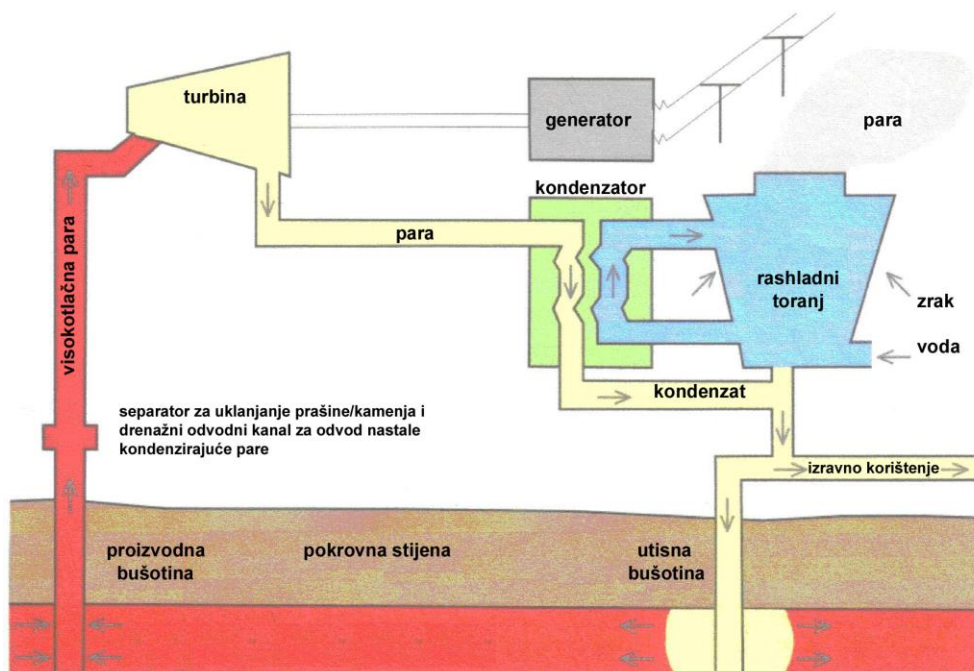
Geotermalne elektrane koje se danas nalaze u radu mogu se podijeliti u tri osnovna tipa: postrojenja sa suhom parom, postrojenja s isparavanjem (jednostrukim i dvostrukim) te binarna postrojenja. Koji će tip postrojenja biti instaliran zavisi o vrsti ležišta. Slika 6 [8] prikazuje područja primjene osnovnih tipova geotermalnih elektrana zavisno o jediničnoj snazi i temperaturi ležišta.



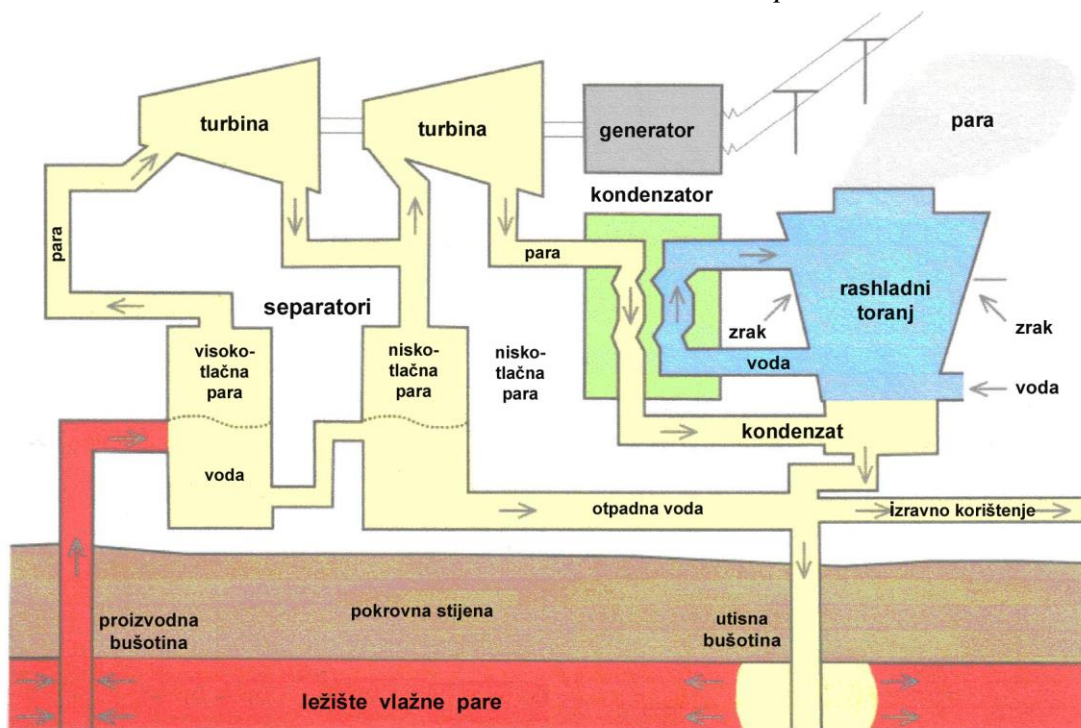
Slika 6. Područja primjene osnovnih tipova geotermalnih elektrana [6]

Geotermalna ležišta dominantna sa suhom parom proizvode suhu paru uz neznatnu količinu vode. Takova se para direktno odvodi u geotermalnu elektranu sa suhom parom gdje ekspandira u turbini obavljajući korisni mehanički rad za pogon električnog generatora, slika 7. Nakon obavljene ekspanzije para se kondenzira u kondenzatoru a nastali kondenzat može se koristiti u rashladnom sustavu elektrane i utiskivati nazad u ležište nadoknađujući vodu i održavajući tlak ležišta.

Za proizvodnju električne energije iz toplom vodom dominantnih geotermalnih ležišta koriste se geotermalne elektrane s jednostrukim ili dvostrukim isparavanjem. Topla voda isparava u jednom ili dva separatora (isparivača) a nastala para se odvodi na ekspanziju u jednu ili dvije turbine. I u ovom slučaju nakon obavljene ekspanzije para se kondenzira u kondenzatoru a nastali kondenzat može se koristiti u rashladnom sustavu elektrane i utiskivati nazad u ležište nadoknađujući vodu i održavajući tlak ležišta. Na slici 8 je prikazana geotermalna elektrana s dvostrukim isparavanjem.



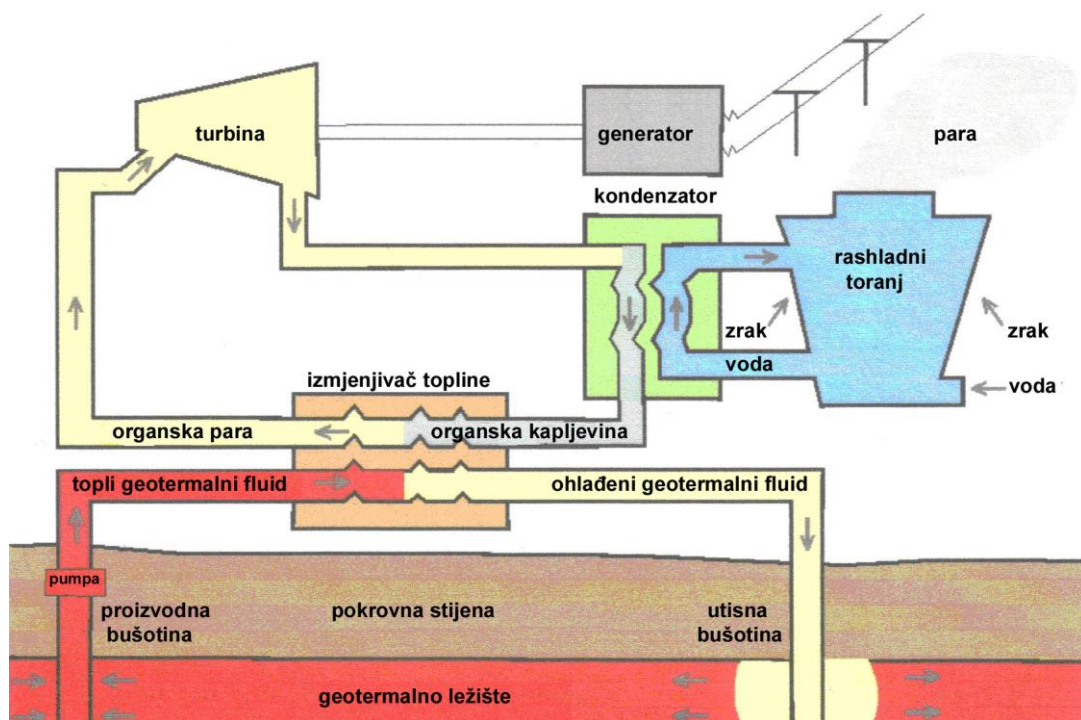
Slika 7. Geotermalna elektrana sa suhom parom



Slika 8. Geotermalna elektrana s dvostrukim isparavanjem

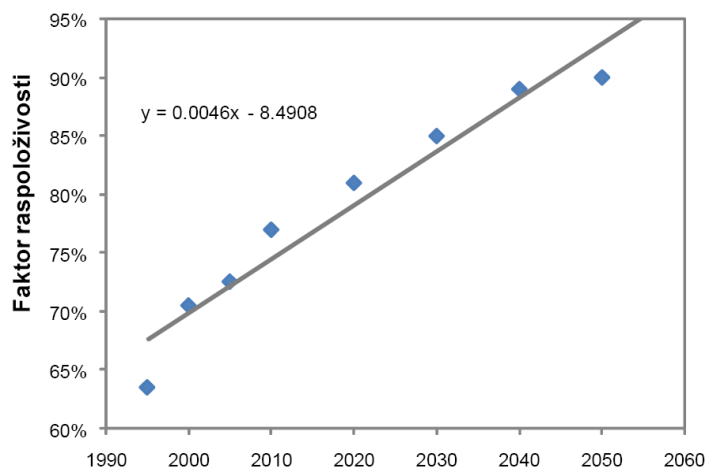
Srednje i niskotemperaturna geotermalna ležišta s temperaturama između 85 i 150°C nisu dovoljno topla za isparavanje, ali se mogu koristiti za proizvodnju električne energije u binarnim geotermalnim elektranama s organskim Rankineovim ciklusom (ORC), slika 9. Kod binarnog postrojenja, geotermalni fluid prolazi kroz izmjenjivač topline, gdje se njegova toplina prenosi na binarni (sekundarni) fluid s niskom točkom ključanja. Zagrijavanjem binarni fluid prelazi u paru koja ekspandira u turbini. Para nakon ekspanzije se odvodi u

kondenzator, a nastali kondenzat se pomoću napojne (cirkulacijske) pumpe vraća ponovo u izmjenjivač topline. Za razliku od geotermalnih elektrana sa suhom parom i s isparavanjem, geotermalni fluid ne dolazi u kontakt s elementima turbine. Ta relativno nova tehnologija je omogućila iskorištavanje manje izdašnih geotermalnih resursa korištenjem binarnih postrojenja manjih kapaciteta i odabirom povoljnog radnog fluida. Daljnja prednost većeg broja tako malih jedinica je da kaskadnim načinom rada omogućavaju optimalno korištenje resursa prema trenutnim zahtjevima za energijom. Binarno postrojenje s Kalina ciklusom bi trebalo poboljšati termodinamičku iskoristivost energetske pretvorbe uporabom mješavine vode i amonijaka (NH_3) koja isparava uz promjenjivu temperaturu a ne kod stalne temperature kao čisti fluidi, pa se prijelaz topline između geotermalnog i radnog fluida odvija uz manje temperaturne razlike [7].



Sika 9. Geotermalna elektrana s binarnim ciklusom

Od 1995. godine prosječni faktor angažirane snage geotermalnih elektrana rastao je kontinuirano, od početnih 64% do sadašnjih 73% kako prikazuje slika 10 [4]. Bolja tehnička rješenja na samim elektranama i napredniji pristup gospodarenju ležištima - kao što su ponovno utiskivanje fluida u ležište, smanjenje korozije i taloženja te bolje poznavanje mogućnosti ležišta kroz napredna geofizička istraživanja – povećavat će faktor angažirane snage linearno do 90%. Ovaj visoki faktor već je postignut na mnogim postojećim postrojenjima.



Slika 10. Faktor angažirane snage za razdoblje 1995-2010. i predviđanja za 2010.-2050. [4]

Geotermalna energija ima cijenu kapitalne investicije od 2 do 4,5 miliona €/MW, što spada u srednji rang u usporedbi s ostalim izvorima energije [4]. No, vrlo povoljne cijene proizvodnje, od 40 do 100 €/MWh čine ju privlačnim resursom za pokrivanje baznog opterećenja [4]. Općenito se može smatrati cjenovno konkurentnim izvorom, jer usprkos visokim početnim investicijama (pronalaženje ležišta, izgradnja bušotina, rizici eksploatacije), jednom izgrađena elektrana nudi visoku pouzdanost i raspoloživost, te minimalne troškove pogona.

4. Energetska analiza geotermalne elektrane Lunjkovec- Kutnjak (GTE Lunjkovec-Kutnjak)

Studijom Konceptija i izvodljivost programa gospodarskog korištenja geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec-Kutnjak [9] prvi puta je u Republici Hrvatskoj postavljen cjelovit program gospodarskog korištenja geotermalne energije na jednom lokalitetu, uz iscrpnu analizu svih važnih okolnosti potrebnih za njegovu konkretnu realizaciju.

Geotermalno ležište Lunjkovec-Kutnjak nalazi se u Koprivničko-Križevačkoj županiji, u općinama Legrad i Mali Bukovec. Navedeno geotermalno ležište površine je 83 km². Dubina ležišta je 2010 m, a srednja debljina je 117,5 m. Obujam geotermalnog fluida je 687 670 000 m³. Ležište prema kategorizaciji geotermalnih resursa spada u srednjetermperaturne resurse [9].

Geotermalno ležište je zatvorena hidro-geološka cjelina bez prirodnog napajanja, pa je kod eksploatacije predviđeno vraćanje iscrpljene geotermalne vode natrag u ležište kako bi se osigurala održivost geotermalnog sustava. Temeljem dokazanih značajki postojećih bušotina, izvedenih od strane INA-e, bušotina Kt-1 definirana je kao proizvodna, a Lun-1 kao utisna bušotina [9].

Prva faza programa iskorištenja geotermalne energije iz ovog ležišta temelji se na eksploataciji geotermalnog fluida na proizvodnoj bušotini Kutnjak 1, dubine 2430 m, te utisnoj bušotini Lunjkovec 1, dubine 2201 m. Temperatura na ušću proizvodne bušotine je 140 °C, tlak je 6 bar, a izdašnost 53 l/s eruptivno, te 70 l/s pomoću uronjene crpke. Udaljenost utisne i proizvodne bušotine je 4,3 km, kao što se vidi na slici 11 [9].

Prema studiji, proizvodnjom električne energije koristi se značajni sadržaj toplinske energije geotermalne vode na najvišoj temperaturnoj razini izvora. Nakon elektrane, geotermalni fluid je dovoljne energetske razine za korištenje u drugim gospodarskim granama [9].

U prvoj fazi realizacije projekta na lokaciji Lunjkovec-Kutnjak proces višenamjenskog korištenja geotermalne energije uključuje geotermalnu elektranu, te sustav distribucije toplinske energije za sušaru (voća i povrća), toplice (vanjski bazeni i hotel s unutarnjim bazenom), plastenike (cvijeća i povrća) i ribogojilište [9].



Slika 11. Geografski položaj bušotina za GTE Lunjkovec-Kutnjak [8]

U drugoj fazi projekta predviđa se izgradnja dodatnih bušotina iz kojih će se osigurati izdašnost od dodatnih 300 l/s geotermalne vode temperature 140°C . Također je predviđena izgradnja dvije dodatne jedinice za proizvodnju električne energije po 4 MW. Pritom dobivena dodatna količina toplinske energije koristit će se za pokrivanje povećanih potreba za toplinskom energijom svih postojećih subjekata na lokaciji, te je moguća opskrba toplinskom energijom grada Koprivnice [9].

Na geotermalnom polju maksimalne temperature 140°C za proizvodnju električne energije nužna je primjena binarnih elektrana. Isparavanjem geotermalnog fluida nastala bi vrlo mala količina pare niskih parametara, koja ne bi omogućila učinkovitu proizvodnju električne energije. Stoga su predložene tehnologije proizvodnje električne energije na lokaciji Lunjkovec-Kutnjak binarna postrojenja s ORC ili Kalina ciklusom. Stoga će te dvije tehnologije biti uspoređene na temelju rezultata termodinamičkih proračuna ciklusa, tj. energetske analize. Termodinamički proračuni su obavljani na računalu pomoću modela binarnog postrojenja s ORC ili Kalina ciklusom, predstavljenog u [10,11,12], pri čemu su termodinamička svojstva radnih fluida određivana pomoću REFPROP programa [13].

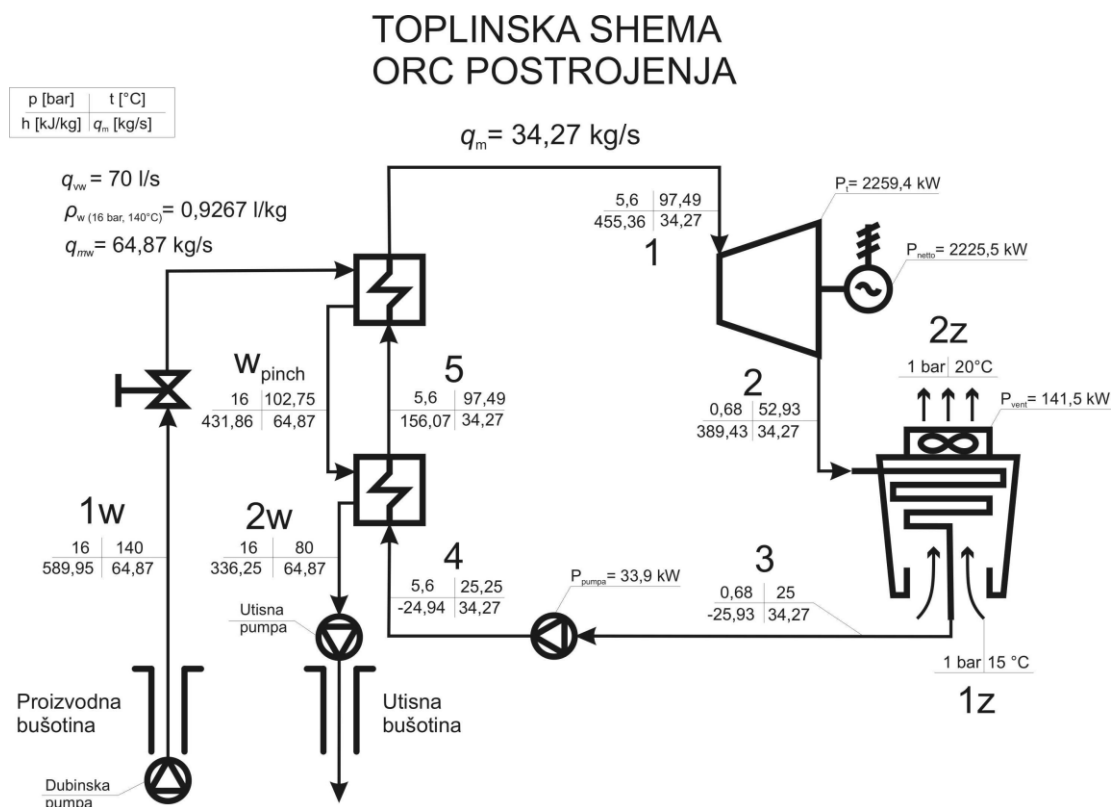
Za oba ciklusa izvršena je optimizacija njihovih glavnih parametara: za ORC gornjeg (maksimalnog) tlaka ciklusa a Kalina ciklus koncentracije amonijaka [11]. Pretpostavljene unutarnje (izentropske) iskoristivosti turbina su kod ORC 0,85 (turbina sa suhozasićenom parom) i kod Kalina ciklusa 0,80 (turbina s vlažnom parom). Za oba slučaja su pretpostavljene unutarnje (izentropske) iskoristivosti napojnih pumpi 0,8. Pošto je na lokaciji Lunjkovec- Kutnjak jedino prihvatljivo rješenje uporaba zrakom hlađenog kondenzatora (vodu za hlađenje trebalo bi transportirati s dosta velike udaljenosti), to je kod njihovih proračuna uzimana srednja godišnja temperatura zraka od 15°C . Kod termodinamičkih proračuna posebna pažnja je posvećena vrijednostima tzv. “pinch” točki koje nisu ispod 5°C .

Potrebe sekundarnih potrošača će se smatrati zadovoljene ograničavanjem temperature geotermalnog fluida na izlazu elektrane na minimalno 80°C, stoga se geotermalni fluid u geotermalnoj elektrani hladi sa 140°C na 80°C.

4.1. Organski Rankineov ciklus (ORC)

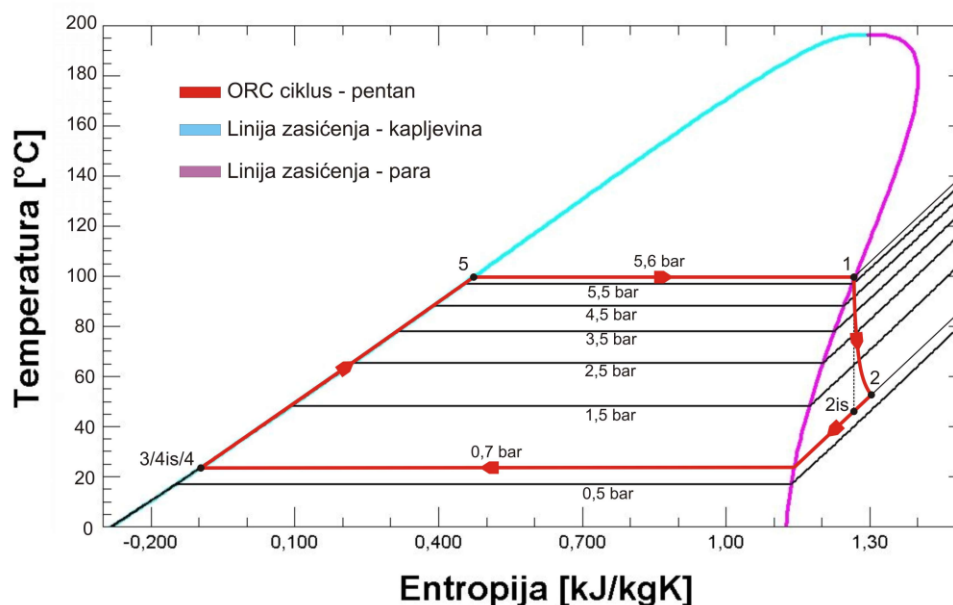
Binarno postrojenje s ORC ciklusom sastoji se od predgrijača, isparivača, turbine s generatorom, napojne pumpe i zrakom hlađenog kondenzatora s ventilatorima. Na toplinskoj shemi postrojenja, slika 12 [11], prikazani su elementi postrojenja i naznačene su veličine stanja u pojedinim karakterističnim točkama ciklusa za projektni režim rada postrojenja.

Geotermalni fluid (stanje 1w, 2w) predaje toplinu radnom fluidu – izopentanu – u isparivaču i predgrijaču. U predgrijaču se kondenzat izopentana (stanje 4) zagrijava do stanja vrele kapljevine (stanje 5), te se u isparivaču prevodi u suhozasićenu paru (stanje 1). Suhozasićena para ekspandira u turbini (iz stanja 1 u stanje 2) dajući korisni mehanički rad za pogon električnog generatora. Nakon ekspanzije u turbini para se odvodi u zračni kondenzator. Prisilnom konvekcijom struje zraka (stanje 1z, 2z) toplina se odvodi u okoliš. Nastali kondenzat (stanje 3) se napojnom pumpom podiže na početni tlak (stanje 4) i vraća u predgrijač i isparivač.



Slika 12. Toplinska shema postrojenja s Organskim Rankineovim Ciklusom (ORC) [11]

Zbog specifičnih svojstava izopentana, vidljivih iz prikaza ciklusa u h - s dijagramu izopentana, slika 13 [11], ekspanzija u turbini se odvija u pregrijanom području. Stoga izostaju problemi vezani uz strujanje vlažne pare kroz turbinu, poput sprečavanja erozije turbinskih lopatica, separacije kapljica, odvoda kondenzata i slično, što pojednostavljuje konstrukciju turbine.

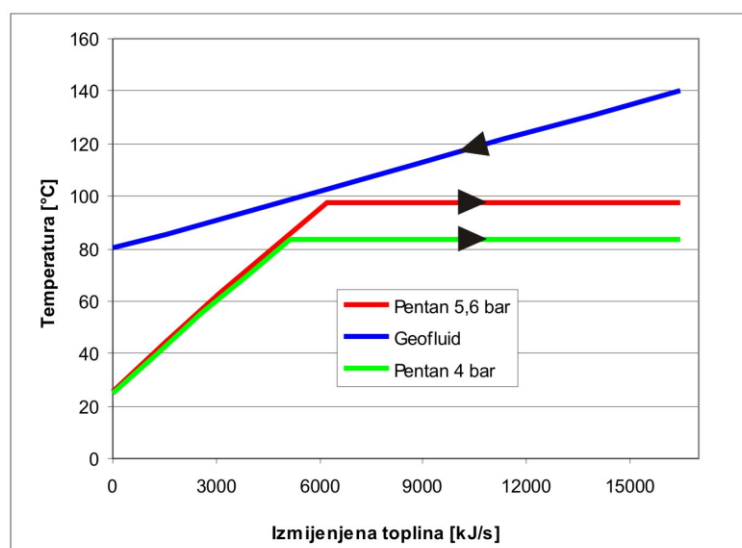


Slika 13. *h-s* dijagram organskog Rankineovog ciklusa (ORC) s izopentanom [11]

4.2. Optimizacija ORC

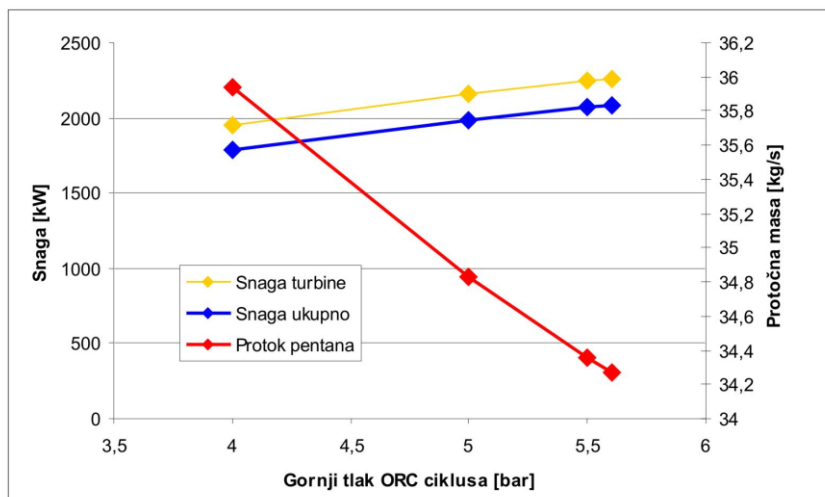
Jednom postavljen matematički model ORC-a omogućio je optimiranje ciklusa promjenom glavnog parametra ciklusa – gornjeg (maksimalnog) tlaka ciklusa.

Kod modela s fiksnom izlaznom temperaturom geotermalnog fluida, konstantna je i toplina predana u predgrijaču-isparivaču. Promjenom gornjeg tlaka ciklusa mijenja se temperatura isparavanja izopentana, a time i protočna masa koju je moguće ispariti predanom toplinom, kao što je to vidljivo iz slike 14 [11]. Kod nižeg tlaka ciklusa isparavanje počinje ranije, pa je istom dovedenom toplinom moguće ispariti veću masu izopentana, ali su parametri dobivene pare niži.



Slika 14. Usporedba isparavanja izopentana pri tlakovima 4 i 5,6 bar [11]

Iz usporedbe na slici 15 [11] se vidi da više snage daje manja količina pare s višim parametrima. Ograničenje porastu tlaka predstavlja razlika temperatura struja u tzv. “pinch” točki predgrijača-isparivača, pa se optimalni tlak bira kao maksimalni kod kojeg ova razlika iznosi odabranih 5°C. Tlakovi viši od 5,6 bar nisu stoga izvedivi uz zadane pretpostavke.



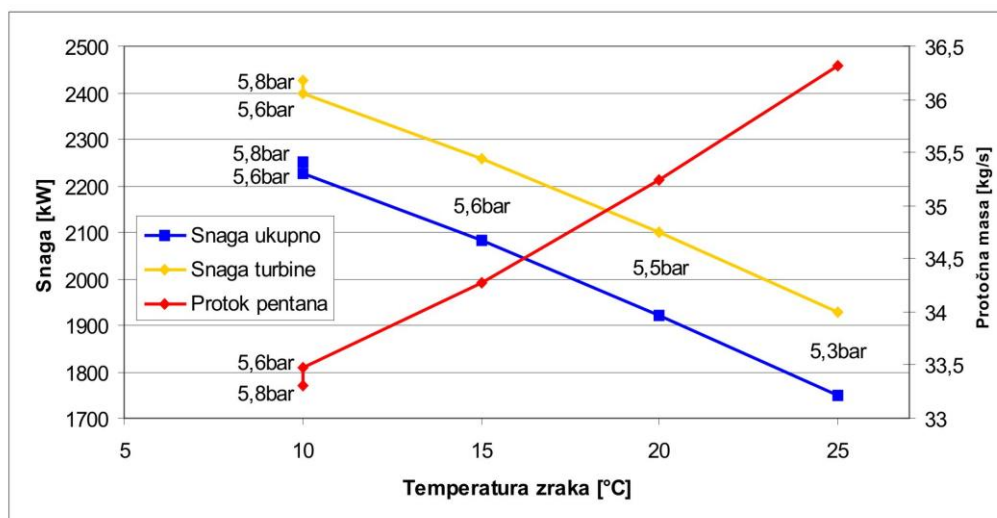
Slika 15. Usporedba ORC s gornjim tlakovima od 4, 5, 5,5 i optimalnih 5,6 bar [11]

Potrebna snaga napojne pumpe raste s porastom gornjeg tlaka, dok snaga ventilatora opada, no njihov zajednički utjecaj na ukupnu snagu postrojenja je približno konstantan, što se vidi iz paralelnih linija snage turbine i ukupne snage na slici 15 [11].

U slučaju da na nekoj lokaciji nema sekundarnih potrošača, već se iz geotermalnog fluida želi dobiti maksimalna količina električne energije, malom prilagodbom matematičkog modela može se pretpostaviti varijabilna izlazna temperatura geotermalnog fluida. U tom slučaju optimalni gornji tlak ciklusa nije ujedno i maksimalni izvedivi tlak.

Postavljeni matematički model ciklusa s fiksnom izlaznom temperaturom geotermalnog fluida omogućio je također analizu rada postrojenja pri varijabilnoj temperaturi zraka u okolišu. Postrojenje je optimirano za rad uz prosječnu godišnju temperaturu zraka od 15°C, no razmotren je rad postrojenja i pri temperaturama od 10, 20 i 25°C, te moguće prilagodbe.

Temperatura zraka, odnosno rashladnog spremnika određuje tlak kondenzacije izopentana, i razumljivo tim je povoljnija što je niža. Primjerice, kod temperature zraka od 10°C vidljivo je povećanje ukupne snage postrojenja s 2260 kW na 2400 kW bez ikakve prilagodbe. U nepovoljnim slučajevima, kada je temperatura zraka viša od prosječne, dolazi do opadanja snage. Ciklus se tada može stabilizirati smanjenjem gornjeg tlaka, to jest optimiranjem za novu temperaturu zraka, što je prikazano na slici 16 [11]. K tome, moguće je povišiti gornji tlak ciklusa kod niže temperature okoliša, čime se dobiva dodatna snaga. Za pojedinu temperaturu zraka na slici 16 [11] naveden je optimalni tlak, a za temperaturu zraka 10°C prikazan je i slučaj bez prilagodbe tlaka.



Slika 16. Usporedba optimalnih ORC za temperature zraka 10, 15, 20 i 25°C [11]

Prilagodba tlaka je jednostavno izvediva i mogla bi se dopuniti automatskom regulacijom, što bi smanjilo zavisnost snage postrojenja o vanjskim uvjetima.

4.3. Kalina ciklus

Binarno postrojenje s Kalina ciklusom sastoji se od isparivača, separatora pare, turbine s generatorom, prigušnog ventila, miješališta, zrakom hlađenog kondenzatora, niskotemperaturnog i visokotemperaturnog rekuperatora, te napojne pumpe. Radni medij ciklusa je mješavina amonijaka i vode. Na toplinskoj shemi postrojenja, slika 17 [11], prikazani su elementi postrojenja i naznačene su veličine stanja u pojedinim karakterističnim točkama ciklusa za projektni režim rada postrojenja.

Geotermalni fluid (stanje 1w, 2w) predaje toplinu u isparivaču za isparavanje osnovne mješavine vode i amonijaka (osnovna koncentracija, stanje 8) do stanja vlažne pare (stanje 9). Zbog različitih temperatura isparavanja amonijaka i vode, vlažna para se sastoji od parovitog dijela s povišenom koncentracijom amonijaka, i kapljevito dijela sa smanjenom koncentracijom amonijaka. U separatoru se izdvaja suhozasićena para s povišenom koncentracijom amonijaka (stanje 1) te odvodi u turbinu. U turbini para ekspandira (od stanja 1 do stanja 2) obavljajući koristan mehanički rad za pogon električnog generatora. Vrela kapljevina sa smanjenom koncentracijom amonijaka (stanje 10) izdvojena u separatoru odvodi se u visokotemperaturni rekuperator gdje dio svoje topline predaje za predgrijavanje kondenzata osnovne mješavine amonijaka i vode. Nakon visokotemperaturnog rekuperatora kapljevina (stanje 11) se prolaskom kroz prigušni ventil prigušuje na tlak koji vlada iza turbine (stanje 12). U miješalište se uvode prigušena kapljevina i vlažna para iz turbine, te nastaje vlažna para osnovne koncentracije (stanje 3). Nastala vlažna para prije odvođenja u zračni kondenzator prolazi kroz niskotemperaturni rekuperator, gdje predaje dio svoje topline struji koja se vraća iz kondenzatora. Na ulazu u kondenzator (stanje 4) vlažna para je stoga manje zagrijana, pa je toplina koju je potrebno predati zraku (stanje 1z, 2z) također manja. Nastali kondenzat (stanje 5) prolazi kroz napojnu pumpu gdje mu se tlak podiže na početnu vrijednost (stanje 6) i zatim ulazi u niskotemperaturni rekuperator gdje preuzima regeneriranu toplinu od struje iz miješališta. Kondenzat zatim ulazi u visokotemperaturni rekuperator (stanje 7), preuzima toplinu od kapljevine iz separatora, i uvodi se u isparivač (stanje 8).

Suhozasićena para bogata amonijakom cijelo vrijeme ekspandira u turbini u vlažnom području, kako prikazuje slika 18 [11], pa se javljaju problemi s vlažnom parom, npr. erozija

TOPLINSKA SHEMA KALINA POSTROJENJA

p [bar]	t [°C]
h [kJ/kg]	q _m [kg/s]

q_{vw} = 70 l/s
 ρ_w (16 bar, 140°C) = 0,9267 l/kg
q_{mww} = 64,87 kg/s

Proizvodna bušotina (Production well) and **Dubinska pumpa** (Deep well pump) feed water into the system.

Utisna bušotina (Injection well) and **Utisna pumpa** (Injection pump) inject the mixture back into the reservoir.

Key parameters at various points:

- Point 1:** 92,45% NH₃, 7,55% H₂O, 30 bar, 135°C, 1898,41 kJ/kg, 10,89 kg/s
- Point 2:** 6,35 bar, 75,1°C, 1699,60 kJ/kg, 10,89 kg/s
- Point 3:** 6,35 bar, 69,9°C, 1232,61 kJ/kg, 15,59 kg/s
- Point 4:** 6,35 bar, 58,5°C, 1107,88 kJ/kg, 15,59 kg/s
- Point 5:** 6,35 bar, 20°C, 183,31 kJ/kg, 15,59 kg/s
- Point 6:** 30 bar, 21,2°C, 190,7 kJ/kg, 15,59 kg/s
- Point 7:** 30 bar, 47,1°C, 315,42 kJ/kg, 15,59 kg/s
- Point 8:** 6,35 bar, 69,7°C, 427,62 kJ/kg, 15,59 kg/s
- Point 9:** 30 bar, 135°C, 1483,29 kJ/kg, 15,59 kg/s
- Point 10:** 30 bar, 135°C, 522,56 kJ/kg, 4,70 kg/s
- Point 11:** 30 bar, 57,1°C, 150,34 kJ/kg, 4,70 kg/s
- Point 12:** 6,35 bar, 57,4°C, 150,34 kJ/kg, 4,70 kg/s

Power outputs:

- Turbine: P = 2165,5 kW
- Generator: P = 1958,2 kW
- Evaporator: P = 143,3 kW
- Pump 4: P = 64 kW

Final state (1z): 1 bar, 15°C

The diagram shows the temperature-entropy (T-s) characteristics of a Kalina cycle using an ammonia-water mixture. The y-axis represents temperature in °C (0 to 200), and the x-axis represents specific entropy in kJ/kgK (0 to 7.0). Key components and processes are labeled:

- Kalina ciklus - osnovna mješavina:** Red solid line with square markers.
- Linija zasićenja - kapljevinu:** Cyan solid line.
- Linija zasićenja - para:** Purple solid line.
- Separator:** Green dashed line with square markers.
- Miješalište:** Yellow dashed line with diamond markers.
- Turbina:** Blue dashed line with diamond markers.

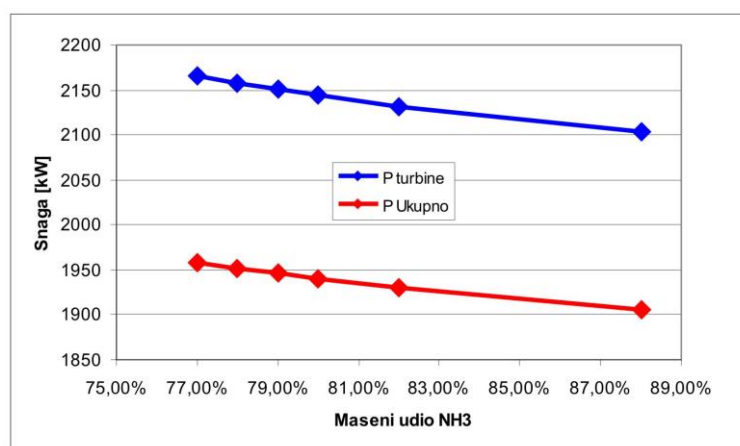
Isobaric saturation curves are shown for pressures of 5, 6.3, 10, 15, 20, 25, and 30 bar. The cycle process points are numbered 1 through 12, indicating the state of the working fluid at various stages.

Slika 18. h-s dijagram Kalina ciklusa sa 77% osnovnom mješavinom amonijaka [11]

Na slici 18 [11] promjene stanja između separatora (9) i miješališta (3) prikazane su crtkano jer bi ovim mješavinama promijenjenog sastava odgovarale druge linije zasićenja i tlakova.

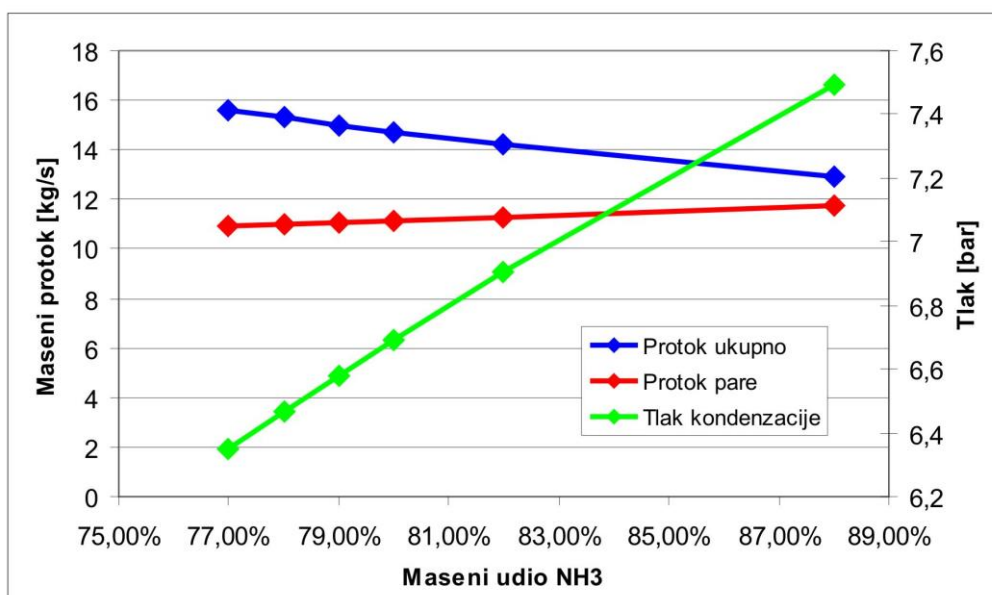
4.4. Optimiranje Kalina ciklusa

Usporedbom rezultata proračuna Kalina ciklusa dobivenih za različite masene udjele amonijaka u osnovnoj mješavini, slika 19 [11], optimalni maseni udio amonijaka u osnovnoj mješavini je 77%, što je ujedno i donja granica dopuštene koncentracije za tlak 30 bar.



Slika 19. Snaga postrojenja s Kalina ciklusom u zavisnosti o masenom udjelu NH₃ [11]

Objašnjenje nudi slika 20 [11], iz koje je vidljivo da, uz poštivanje u modelu zadanih pretpostavki (ulazni parametri pare u turbinu jednaki za sve slučajeve), protok pare lagano opada sa smanjenjem masenog udjela amonijaka. No pad masenog udjela amonijaka u osnovnoj mješavini bitno utječe na tlak kondenzacije, a time i na ekspanziju pare u turbini odnosno snagu postrojenja.



Slika 20. Protoci i tlak kondenzacije Kalina ciklusa u zavisnosti o masenom udjelu NH₃ [11]

Ukupni maseni protok se povećava iz razloga što uz nižu koncentraciju amonijaka dolazi i viša koncentracija vode, koja služi prvenstveno kao "moderator" pri isparavanju (i kondenzaciji), približavajući krivulju isparavanja krivulji hlađenja geotermalnog fluida.

Niža koncentracija amonijaka u mješavini se postiže većom količinom vode, tako da se ukupni maseni protok u ciklusu povećava. Bez obzira na veću količinu vode koja se grije u isparivaču (veći ukupni protok i veći udio vode), približno se isparava ista količina amonijaka. Većina vode ostaje u kapljevitom stanju i izdvaja se u separatoru, obilazeći turbinu. Također, većina energije koja se koristi za zagrijavanje vode se regenerira, tj. ostaje u ciklusu zbog ugrađena dva rekuperatora. Stoga, povećani maseni protok vode dovodi do ograničenog negativnog utjecaja. S druge strane, povećani maseni protok vode mijenja koncentraciju mješavine, smanjujući njen tlak kondenzacije i na taj način uvjetujući da približno konstantni tok amonijaka proizvede više rada u turbini.

5. Rezultati i diskusija

Termodinamički proračun ORC daje ukupnu snagu od 2259,9 kW uz maseni protok 34,27 kg/s, dok termodinamički proračun Kalina ciklusa daje ukupnu snagu od 2165,5 kW uz maseni protok 15,59 kg/s. Ako se od ukupne snage oduzme odgovarajuća snaga za rad napojne pumpe, koja u slučaju ORC je 33,9 kW, a u slučaju Kalina ciklusa 64 kW, dobiva se netto snaga, koja je u slučaju ORC 2225,5 kW a u slučaju Kalina ciklusa 2101,4 kW. Termodinamička iskoristivost računata na temelju dobivene netto snage i dovedene topline s geotermalnog fluida u slučaju ORC je 13,5% a u slučaju Kalina ciklusa 12,8%.

Čak niti u ovom slučaju srednjetermperaturnog geotermalnog izvora s relativno niskom temperaturom geotermalne vode, Kalina ciklus nije termodinamički bolji od ORC. Ipak, potrebno je naglasiti da u slučaju srednjetermperaturnog izvora s relativno niskom temperaturom geotermalne vode, razlika termodinamičkih iskoristivosti između ORC i Kalina ciklusa je manja nego u slučaju srednjetermperaturnog geotermalnog izvora s relativno visokom temperaturom geotermalne vode (Velika Ciglena – 175°C) kako rezultati proračuna u [10, 12] to pokazuju (14,1% spram 10,6%). Ponovo relativno visoka temperatura rashladnog fluida u kondenzatoru (15°C) ima nepovoljniji utjecaj na Kalina ciklus nego na ORC, tako da je ORC termodinamički bolji od Kalina ciklusa. U takovim uvjetima tlak kondenzacije kod Kalina ciklusa je znatno viši nego kod ORC (u ovom slučaju 6,35 bar u usporedbi s 0,68 bara).

Također potrebno je uzeti u obzir da je danas tek jedna geotermalna elektrana s Kalina ciklusom u radu, Husavik na Islandu, a nekoliko je u izgradnji [14]. Dok postoje izvještaji [14] o problemima tokom puštanja u pogon i probnog rada jedinog postrojenja s Kalina ciklusom u svijetu, istovremeno ORC ima niz prednosti [15]. Danas je ORC u potpunosti usvojena tehnologija sa stotinama megawatta instaliranih diljem svijeta [16].

6. Zaključak

U Republici Hrvatskoj ima nekoliko srednjetermperaturnih geotermalnih izvora s relativno niskom temperaturom geotermalne vode pomoću kojih je moguća proizvodnja električne energije, Lunjkovec-Kutnjak (140°C), Ferdinandovac (125°C), Babina Greda (125°C) i Rečica (120°C). Na temelju svjetskih iskustava kao primjenjiva rješenja u prvi plan dolaze binarna postrojenja s ORC ili Kalina ciklusom. U ovom je radu usporedba binarnih postrojenja s ORC i Kalina ciklusom provedena za srednjetermperaturni geotermalni izvor Lunjkovec-Kutnjak (140°C). Pokazano je da je postrojenje s ORC termodinamički bolje, kao i u slučaju srednjetermperaturnog geotermalnog izvora Velika Ciglena s relativno visokom temperaturom geotermalne vode (175°C), kako to rezultati proračuna u [10, 12] pokazuju. U oba slučaja to

se može objasniti s relativno visokim temperaturama okolišnjeg zraka za hlađenje (15°C). Uzimajući u obzir da je na lokacijama navedenih geotermalnih izvora zračno hlađenje jedini isplativi način i probleme koje prolaze sve nove tehnologije u svojoj ranoj fazi primjene, to se primjena binarnih postrojenja s ORC predlaže i za srednjetermperaturne geotermalne izvore u Republici Hrvatskoj s relativno niskom temperaturom (Lunjkovec-Kutnjak, Ferdinandovac, Babina Greda i Rečica).

Literatura

1. DiPippo, R., *Geothermal Power Plants – Principles, Applications and Case Studies*, Elsevier Ltd, Oxford, 2005.
2. Gupta H., Roy S., *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century*, Elsevier B.V., Amsterdam, 2007.
3. Bertani, R., World Geothermal Generation in 2007, *Proceedings of The European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, 2007.
4. Fridleifsson, I.B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J., The Possible Role and Contribution of Geothermal Energy to the Mitigation On Climate Change, *Proceedings of IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*, Luebeck, Germany, January 2008.
5. *A Program of Geothermal Energy Usage in the Republic of Croatia*, Energy Institute “Hrvoje Požar”, available at: www.eihp.hr
6. Clauser, C., *Geothermal Energy*. In: Heinloth K., ed., *Group VIII: Advanced Materials and Technologies*, p. 493-604, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 2006.
7. Micak, H.A., Kalina cycle® concepts for low temperature geothermal, *Geothermal Res. Council Trans.*, Vol. 26, pp 703-713, 2002.
8. *The Future of Geothermal Energy*, Massachusetts Institute of Technology, Available at: <http://geothermal.inel.gov>
9. “*Concept and feasibility of the program for economic geothermal energy exploitation at the location Lunjkovec-Kutnjak*”, Faculty of Economy, University of Zagreb, Zagreb 2007.
10. Guzović, Z., Lončar, D., Ferdelji, N., Possibilities of Electric Power Generation In the Republic of Croatia by Means of Geothermal Energy, *Proceedings of 21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems – ECOS 2008*, Krakow, Poland, June 24-27, 2008.
11. Majcen, B., Steam Turbine for Geothermal Power Plant Lunjkovec–Kutnjak, *M.Sc. Thesis*, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Zagreb, 2009.
12. Guzović, Z., Lončar, D., Ferdelji, N., Possibilities of Electric Power Generation In the Republic of Croatia by Means of Geothermal Energy, *Energy The International Journal*. 35(2010)8, pp. 3429-3440.
13. Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M. O., *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, NIST Standard, Reference Detabase 23, Version 8.0*, Physical and Chemical Properties Division, U.S. Secretary of Commerce on behalf of The United States of America, USA, 2008.
14. Maack, R., Valdimarsson, P., Operating Experience with Kalina Power Plants. In *Workshop Proceedings: Geothermische Stromerzeugung Stand der Technik und Perspektiven*, VDI Berichte 1703, 17-18 October, 2002.
15. Abisa, M.T., *Geothermal Binary Plant Operation and Maintenance – Systems with Svartsengi Power Plant as a Case Study*, The United Nations University Report No. 15, Reykjavik, Iceland, 2002.

16. Bronicki, L.Y., Implementing new power plant technologies-Technical and Economic Aspect, *In Proceedings: Geothermal Energy and Territory*, Pomerance, Italy, 19 January, 2004.